View metadata, citation and similar papers at core.ac.uk
brought to you by CORE
provided by Servicio de Difusión de la Creación Intelectual

Diseño simplificado de controladores fuzzy MIMO con estructuras fuzzy SISO

Sergio Martínez[1], Enrique Tarifa[1,2] y Samuel Franco[1]

[1] Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy,
Ítalo Palanca 10, S. S. de Jujuy, Jujuy, Argentina
{smartinez, eetarifa, sfdominguez}@fi.unju.edu.ar
(2) CONICET, Argentina.
eetarifa@gmail.com

Resumen. El diseño de controladores fuzzy a lazo cerrado puede resultar relativamente simple a partir de las variables de control estándares, tales como error, variación de error y/o suma de errores, requiriendo un conocimiento mínimo de la dinámica del sistema a controlar. La simplicidad mencionada no lo es tanto cuando se trata con estructuras de tipo MIMO, ya que las relaciones entre múltiples variables hacen necesarias reglas de control más complejas. En este trabajo se propone un procedimiento de diseño de sistemas de control tipo MIMO basados en lógica fuzzy, sin mayores requerimientos de conocimiento experto del sistema a controlar, utilizando una configuración novedosa con sistemas de inferencia fuzzy simples tipo SISO. El procedimiento se aplica en el diseño de un controlador para un mezclador de corrientes líquidas en línea. Mediante pruebas realizadas, se analiza el desempeño del controlador diseñado y se lo compara con el desempeño de un controlador fuzzy MIMO estándar diseñado para la misma planta.

Palabras Clave: Control P-I-D. Sistemas fuzzy. Tablas de MacVicar – Whelan. Mezclador de flujos.

1 Introducción

Un clásico punto de vista que clasifica a los sistemas en general, y que da una idea del grado de complejidad que representan, de acuerdo a la cantidad de entradas y de salidas que contiene el sistema. Así por ejemplo, los más simples suelen ser los sistemas tipo SISO (Single Input – Single Output) con una entrada y salida; los más comunes son los de tipo MISO (Multiple Input – Single Output) que pueden contener más de una entrada y solamente una salida; no muy difundidos son los de tipo SIMO (Single Input – Multiple Output) donde una entrada única provoca varias salidas y el tipo más general es el MIMO (Multiple Input – Multiple Output) donde el sistema contiene más de una entrada para generar varias salidas.
De hecho, un sistema de control también responde a la clasificación anterior y resulta lógico considerar que la complejidad del sistema de control naturalmente tiende a aumentar con la complejidad del sistema controlado. En sistemas del tipo MIMO, la

interacción entre múltiples variables complica la estimación del efecto que cada variable de entrada tiene sobre cada variable de salida; debido a ello, tales sistemas generan modelos complejos que muchas veces deben ser linealizados o aproximados para el diseño de los sistemas de control que también serán complejos.
La mayoría de las soluciones en control lineal y no lineal desarrolladas en las últimas tres décadas se basaron en modelos matemáticos precisos de los sistemas a controlar. Muchos de estos sistemas resultaron difíciles —a veces imposible— de describir mediante relaciones matemáticas convencionales, por lo que aquellos controladores basados en este enfoque generaron resultados poco satisfactorios [1].
En este trabajo se propone un procedimiento de diseño de sistemas de control tipo MIMO basados en lógica fuzzy, sin mayores requerimientos de conocimiento experto del sistema a controlar, utilizando una configuración novedosa de los sistemas de inferencia fuzzy simples tipo SISO. El procedimiento se aplica en el diseño de un controlador para una planta MIMO que representa a un mezclador de corrientes líquidas en línea (sin depósito). Mediante pruebas realizadas, se analiza el desempeño del controlador diseñado y se lo compara con el desempeño de un controlador fuzzy MIMO estándar diseñado para la misma planta.

2 Fundamentos de la teoría de control

Los sistemas de control de lazo cerrado o realimentados mantienen una relación intrínseca entre la entrada y la salida, comparándolas y utilizando la diferencia como parámetro de control. En este tipo de control, se destacan como configuraciones básicas las de tipo Proporcional (P), Integral (I) y Derivativo (D). La combinación de éstas, permite generar nuevas configuraciones, con mejores propiedades, siendo las más usuales las de tipo Proporcional–Integral (PI), Proporcional–Derivativo (PD) y la más general Proporcional–Integral–Derivativo (PID) [2]. Según sea la naturaleza del sistema a controlar, sus requerimientos o la interpretación del diseñador del sistema de control, se pueden aplicar las diferentes estructuras de control mencionadas, como se esquematiza en la Fig. 1.

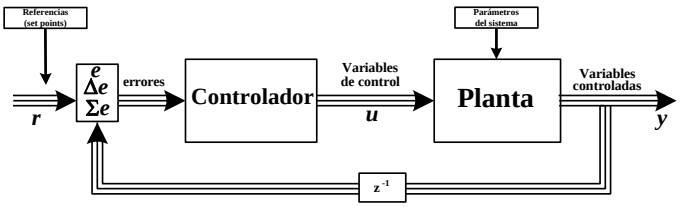

Fig. 1. Esquema genérico de un sistema controlador – planta.

El sistema a controlar —usualmente referenciado como planta— recibe las variables de control (u) y genera a la salida las variables controladas (y), que son realimentadas y comparadas con sus respectivas variables de referencia o *set points* (r), obteniéndose las variables de control clásicas —error (e), suma de errores (Σe) y variación del error (Δe)— que el controlador tiende a minimizar en valor absoluto.

Para un controlador SISO del tipo PID, la ley de control general —en el formato de tiempo discreto— establece que la salida de control u se define como [3]:

$$u(k) = u_0 + K_P\, e(k) + K_I \Sigma e(k) + K_D\, \Delta e(k)\,. \qquad \textbf{(1)}$$

donde k es el tiempo (discreto en este caso), u_0 es la salida en vacío o *bias*, K_P, K_I y K_D son los parámetros del controlador. Cada término de la expresión dada corresponde a un efecto de control determinado: el efecto proporcional (P), que es función del error $e(k)$; el efecto integral (I), que es función de la suma de los errores producidos $\Sigma e(k)$; y el efecto derivativo (D), que responde a la variación entre el error actual y el anterior $\Delta e(k) = e(k) - e(k\text{-}1)$.
De acuerdo al diseño del controlador, la acción de control puede utilizarse en forma absoluta (ec. (1)), o como una variación de la acción de control $\Delta u(k)$, a partir de la cual el valor final de control se calcula como [4]:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)\,. \qquad \textbf{(2)}$$

luego, con las ecuaciones (1) y (2) se puede obtener la variación de la acción de control que resulta:

$$\Delta u(k) = K_P\,(e(k) - e(k-1)) + K_I\, e(k) + K_D\,(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))\,. \qquad \textbf{(3)}$$

Agrupando las variables y definiendo nuevas contantes, se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta u(k) = K_0\, e(k) + K_1 e(k-1) + K_2 e(k-2)\,. \qquad \text{con} \quad \begin{cases} K_0 = (K_P + K_I + K_D) \\ K_1 = -(K_P + 2K_D) \\ K_2 = K_D \end{cases} \qquad \textbf{(4)}$$

A partir de las ecuaciones (1) y (3) se pueden deducir los diferentes tipos básicos de controladores, como estructuras individuales o combinadas, según se requiera. Por ejemplo, anulando los parámetros K_I y K_D, se obtiene un controlador tipo proporcional:

$$\begin{aligned} u(k) &= K_P\, e(k). \\ \Delta u(k) &= K_P\, \Delta e(k). \end{aligned} \qquad \text{con} \quad u_0 = 0 \quad \text{y} \quad K_I = K_D = 0 \qquad \textbf{(5)}$$

Con la eliminación de los parámetros K_P y K_D, el controlador resultante es de tipo integral, cuyas ecuaciones representativas son:

$$\begin{aligned} u(k) &= K_I \Sigma e(k). \\ \Delta u(k) &= K_I\, e(k). \end{aligned} \qquad \text{con} \quad u_0 = 0 \quad \text{y} \quad K_P = K_D = 0 \qquad \textbf{(6)}$$

Un controlador de tipo derivativo se obtiene a partir de la anulación de los parámetros K_P y K_I cuyas ecuaciones representativas son:

$$\begin{aligned} u(k) &= K_{\mathrm{D}}\,\Delta e(k). \\ \Delta u(k) &= K_{\mathrm{D}}\,(\Delta e(k) - \Delta e(k-1)). \end{aligned} \qquad \text{con} \quad u_0 = 0 \quad \text{y} \quad K_{\mathrm{P}} = K_{\mathrm{I}} = 0 \qquad (\mathbf{7})$$

Configuraciones combinadas se obtienen, por ejemplo anulando el parámetro K_{D}, para un controlador tipo proporcional–integral:

$$\begin{aligned} u(k) &= K_{\mathrm{P}}\,e(k) + K_{\mathrm{I}}\,\Sigma e(k). \\ \Delta u(k) &= K_{\mathrm{P}}\,\Delta e(k) + K_{\mathrm{I}}\,e(k). \end{aligned} \qquad \text{con} \quad u_0 = 0 \quad \text{y} \quad K_{\mathrm{D}} = 0 \qquad (\mathbf{8})$$

De manera similar, la anulación del parámetro K_{I} genera la estructura del controlador tipo proporcional–derivativo:

$$\begin{aligned} u(k) &= K_{\mathrm{P}}\,e(k) + K_{\mathrm{D}}\,\Delta e(k) \\ \Delta u(k) &= K_{\mathrm{P}}\,\Delta e(k) + K_{\mathrm{D}}\,(\Delta e(k) - \Delta e(k-1)) \end{aligned} \qquad \text{con} \quad u_0 = 0 \quad \text{y} \quad K_{\mathrm{I}} = 0 \qquad (\mathbf{9})$$

En base a las ecuaciones anteriores, se diseñan e implementan controladores fuzzy que responden a tales configuraciones. La selección de las diferentes configuraciones, dependerá del tipo de control que se requiera, contando con las ventajas de cada una.

3 Controladores fuzzy

Los controladores basados en lógica fuzzy utilizan un modo de razonamiento aproximado que se asemeja al proceso de toma de decisiones de un humano experto, sustentado en un conjunto de reglas lingüísticas [5].

La base de un controlador fuzzy es un sistema de inferencia (Fig. 2). Dentro de la estructura organizacional general de tal sistema, se pueden destacar como componentes básicos los siguientes:

- Fuzzyficación: Proceso mediante el cual las variables de control convierten sus valores instanciados en valores de pertenencia dentro de un intervalo [0, 1] a través de un conjunto de funciones de pertenencia asociadas para cada variable.
- Base de reglas: Conjunto de reglas condicionales que establecen los valores de las variables manipuladas o de control (variables salida del controlador y de entrada del sistema) en función de las variables controladas (variables de entrada del controlador y de salida del sistema).
- Motor de inferencia: Estructura lógica que relaciona los hechos iniciales del proceso, a través de las reglas fuzzy, para determinar las condiciones que asumen las variables de control.
- Defuzzyficación: Proceso que reconvierte los resultados fuzzy de la composición de todas las reglas ejecutadas a valores nítidos para ser asignados a las variables de control que actuarán sobre el proceso.

El diseño de controladores a lazo cerrado —incluyendo a los controladores fuzzy—, en general puede resultar relativamente simple a partir de las variables de control estándares, tales como e (error – tipo proporcional), Δe (variación de error – tipo

derivativo) y/o Σe (suma de errores – tipo integral), requiriendo un conocimiento mínimo de la dinámica del sistema a controlar.

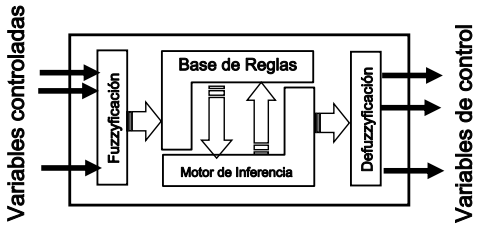

Fig. 2. Sistema de inferencia fuzzy configurado como controlador.

La simplicidad mencionada no es tanta cuando el controlador fuzzy es de tipo MIMO, debido a las relaciones entre múltiples variables, especialmente si tales relaciones no son lineales. Controladores de este tipo, bajo una estructura de Mamdani responden a reglas fuzzy de la forma:

SI Var_1 es P_1 Y Var_2 es P_2 … ENTONCES u_1 es Q_1 Y u_2 es Q_2 …

donde Var_i y u_j son las variables de entrada y salida respectivamente; P_i y Q_j son las correspondientes etiquetas lingüísticas asociadas y los enlaces (Y) son los conectivos lógicos fuzzy que relacionan a las diferentes variables. En este caso es fundamental el conocimiento experto del sistema para una interpretación correcta de las relaciones.

El procedimiento general para diseñar un controlador fuzzy, se puede resumir en los siguientes pasos [6]:

- Identificar las variables (entradas, estado y salidas) de la planta.
- Segmentar el universo de discurso o el alcance de cada variable en un número de particiones, asignando a cada una de ellas una etiqueta lingüística. Usualmente tales alcances se utilizan normalizados a [0,1] ó [–1, +1].
- Asignar una función de pertenencia a cada partición.
- Establecer las relaciones entre las variables de entrada o de estado fuzzy con las variables de salida fuzzy, para formar la base de reglas.
- Seleccionar los factores de escala apropiados de las variables de entrada y salida, para normalizar tales variables a los intervalos [0,1] ó [–1, +1].

En este trabajo se propone una configuración simplificada de un controlador fuzzy MIMO, utilizando controladores fuzzy básicos tipo SISO. Considerando por ejemplo la estructura de tipo proporcional–integral (ec. (**7**)), se tiene:

$$\Delta u(k) = K_{\mathrm{P}}\,\Delta e(k) + K_{\mathrm{I}}\,e(k). \qquad (\mathbf{10})$$

donde $\Delta u(k)$ es la variación de la acción de control en tiempo k, $e(k)$ es el error de control, $\Delta e(k)$ es la variación del error y (K_{p}, K_{I}) son las contantes paramétricas de esta configuración. Luego, para cada variable controlada se tiene:

$$\Delta u_i(k) = \sum_{i=1}^{N} K_{\mathrm{P}i}\,\Delta e_i(k) + K_{\mathrm{I}i}\,e_i(k). \qquad \text{con } i=1,\ldots,N \qquad (\mathbf{11})$$

siendo N la cantidad de variables controladas de la planta. Luego, la acción de control completa para cada una de estas variables se puede calcular como:

$$u_i(k) = u_i(k-1) + \Delta u_i(k). \qquad \text{con } i=1,...,N \qquad (\mathbf{12})$$

Como se planteó anteriormente, configurar un controlador fuzzy MIMO puede ser complicado por las implicancias que tiene relacionar todas las variables de entrada y de salida simultáneamente. Por el contrario, el controlador fuzzy SISO propuesto resulta bastante simple y requiere un mínimo de conocimiento del proceso a controlar. MacVicar-Whelan [7] estableció un conjunto de tablas o matrices de decisión, para diferentes grados de particiones, que relacionan la variable manipulada (Δu) con la variable error (e) y la variación de error (Δe). Las relaciones empleadas en estas tablas están sustentadas por la teoría de lógica fuzzy y el sentido común en ingeniería; de esta manera, las citadas tablas constituyen una base estándar y general para diseñar controladores fuzzy. En la Tabla 1 se muestran estas matrices para tres, cinco y siete particiones de las variables.

Tabla 1. Tablas de decisión fuzzy de MacVicar-Whelan para a) tres particiones; b) cinco particiones; c) siete particiones.

a) $\Delta u = F(e,\Delta e)$

e \ Δe	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

b) $\Delta u = F(e,\Delta e)$

e \ Δe	NG	NP	Z	PP	PG
NG	NG	NG	NG	NP	Z
NP	NG	NP	NP	Z	PP
Z	NG	NP	Z	PP	PG
PP	NP	Z	PP	PP	PG
PG	Z	PP	PG	PG	PG

c) $\Delta u = F(e,\Delta e)$

e \ Δe	NG	NP	ZN	Z	ZP	PP	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NP	ZN	Z
NP	NG	NP	NP	NP	ZN	Z	ZP
ZN	NG	NP	ZN	ZN	Z	ZP	PP
Z	NG	NP	ZN	Z	ZP	PP	PG
ZP	NP	ZN	Z	ZP	ZP	PP	PG
PP	ZN	Z	ZP	PP	PP	PP	PG
PG	Z	ZP	PP	PG	PG	PG	PG

a) N = Negativo
Z = Cero
P = Positivo

b) NG = Negativo Grande
NP = Negativo Pequeño
Z = Cero
PP = Positivo Pequeño
PG = Positivo Grande

c) NG = Negativo Grande
NP = Negativo Pequeño
ZN = Cero Negativo
Z = Cero
ZP = Cero Positivo
PP = Positivo Pequeño
PG = Positivo Grande

Considerando que las variables de entrada al controlador son el error $e(k)$ y su variación $\Delta e(k)$, y la variable de salida es la variación de la acción de control $\Delta u(k)$, tales bases de reglas quedan sustentadas por los criterios establecidos en las siguientes metarreglas:

- Si el error y la variación del error son cero, entonces la variación de la salida de control es cero.
- Si el error tiende a cero a un ritmo satisfactorio, entonces la variación de la salida de control es cero.
- Si el error no se corrige, entonces la variación en la salida de control no es cero y depende del signo y la magnitud del error y de la variación del error.

Con estos criterios se pueden formular conjuntos razonablemente lógicos de reglas generales para conformar bases genéricas de conocimiento aplicable a un controlador fuzzy. Luego, tales bases pueden ser ajustadas excluyendo, modificando o agregando nuevas reglas de control basadas en las condiciones específicas del problema de

control en consideración. El mínimo conocimiento necesario para la formulación de las bases, requiere establecer la naturaleza cualitativa de la relación existente entre las variables de error y la variación de la acción de control. Si ambas variables varían simultáneamente en el mismo sentido ($e(k)\uparrow \Rightarrow \Delta u(k)\uparrow$) las tablas se aplican como se muestran en la Tabla 1; si varían en sentido opuesto ($e(k)\uparrow \Rightarrow \Delta u(k)\downarrow$) las tablas se aplican transpuestas.

4 Caso de estudio

4.1 Modelo de la planta

Para mostrar el desempeño de la configuración propuesta de controladores fuzzy SISO sobre una planta MIMO, se utiliza un mezclador de caudales en línea que posee dos variables de entrada y dos de salida. Los dispositivos conocidos como mezcladores de flujos o de caudales (*flow mixers*) mezclan corrientes de fluidos para producir una nueva corriente con propiedades específicas (caudal, presión, temperatura, composición, etc.). Son muy utilizados como complemento de diversos procesos industriales, y suelen estar sometidos a dinámicas muy exigentes, siendo necesaria la asistencia de sistemas de control automáticos para su operación. Un modelo simplificado del sistema mezclador de caudales se muestra en la figura siguiente:

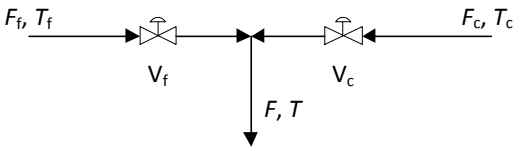

Fig. 3. Esquema de mezclador de caudales en línea.

Una corriente de entrada, que se identifica como fría, tiene un caudal máximo F_f y una temperatura T_f. Esta corriente es regulada por la apertura x_f de la válvula V_f. La otra corriente de entrada, que se identifica como caliente, tiene un caudal máximo F_c y una temperatura T_c. Esta corriente es regulada por la apertura x_c de la válvula V_c. Las aperturas x_f y x_c incursionan en el intervalo [0, 1], donde 0 corresponde a la válvula completamente cerrada y 1 a la válvula completamente abierta. La corriente mezcla presenta a la salida un caudal F a una temperatura T. A partir del esquema anterior, las ecuaciones (13) y (14) definen al modelo del mezclador:

$$F = x_f F_f + x_c F_c \qquad 0 \le x_f, x_c \le 1 \tag{13}$$

$$T = \frac{x_f F_f T_f + x_c F_c T_c}{x_f F_f + x_c F_c} \qquad 0 \le x_f, x_c \le 1 \tag{14}$$

donde el caudal F y la temperatura T de la corriente de salida dependen de las condiciones de las corrientes de entrada $\{F_f, T_f, F_c, T_c\}$ y de las aperturas x_f y x_c de sus

respectivas válvulas. Se asume que los sensores de las variables controladas están cerca del punto de mezcla, por lo cual el retardo de las mediciones es despreciable.
El modelo experimental se ha implementado sobre el entorno de simulación gráfica de Matlab® y se ha instanciado con los siguientes parámetros, que serán aplicados a las pruebas experimentales:

- Corriente fría: caudal de entrada F_f = 100 l/min, temperatura T_f = 25 ºC.
- Corriente caliente: caudal de entrada F_c = 100 l/min, temperatura T_c = 70 ºC.

4.2 Controlador fuzzy

Para la planta de la Fig. 3, se requeriría un controlador fuzzy MIMO con reglas que establezcan las relaciones entre los errores de las dos variables de salida (T y F) respecto de sus referencias (T_{sp} y F_{sp}) para establecer las acciones de control de las válvulas reguladoras (x_f y x_c), actuando en forma simultánea.
El proceso de diseño propuesto, utiliza controladores fuzzy SISO tipo PI, donde cada uno trata solamente una variable controlada y una variable manipulada, como se definió en la ecuación (11). Las variables de control utilizadas son el error de caudal (e_F) de la corriente de salida F y el error de temperatura (e_T), respecto de sus correspondientes valores de referencia (*setpoint*) F_{SP} y T_{SP}; juntamente con las variaciones de sus errores Δe_F y Δe_T:

$$\begin{aligned} e_F &= F_{SP} - F \\ \Delta e_F(k) &= e_F(k) - e_F(k-1) \end{aligned} \quad \text{con} \quad 0 \le F \le 200\, l/s \qquad (\mathbf{15})$$

$$\begin{aligned} e_T &= T_{SP} - T \\ \Delta e_T(k) &= e_T(k) - e_T(k-1) \end{aligned} \quad \text{con} \quad 25 \le T \le 70\ °C \qquad (\mathbf{16})$$

Para ser configuradas como variables fuzzy, se particionan en tres términos lingüísticos, de acuerdo a la Tabla 1.a. La Fig. 4.a muestra las funciones de pertenencia asociadas que se definen con un formato triangular clásico con solapamiento del 50 %. Así también, las variables controladas configuradas como variaciones Δx_f y Δx_c que actúan sobre las válvulas de corriente fría V_f y corriente caliente V_c, correspondientes a las salidas del controlador, se configuran en el contexto fuzzy bajo el mismo esquema, como se muestra en la Fig. 4.b. En ambos casos y para simplificar el diseño, se establece como alcance de las variables el entorno normalizado [–1, +1].

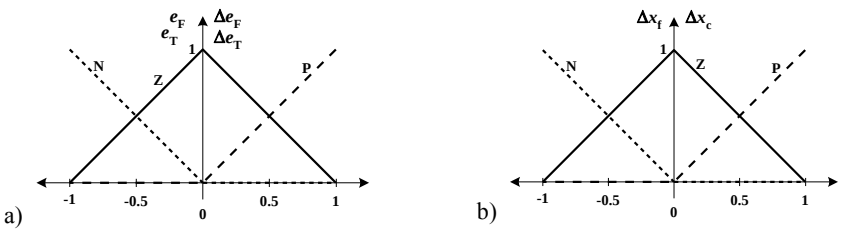

Fig. 4. Particiones fuzzy para las variables a) de entrada y b) de salida del controlador.

4.3 Desarrollo experimental

El sistema completo controlador–planta, implementado como un modelo de simulación en el entorno Simulink® de Matlab®, se muestra en la Fig. 5. En tal esquema los bloques sombreados corresponden al modelo del mezclador de caudales y al conjunto de cuatro controladores fuzzy SISO que acoplados constituyen el sistema de control fuzzy MIMO tipo PI. El sistema cuenta además con los parámetros correspondientes (T_c, T_f, F_c, F_f) asociados a señales adicionales que pueden activarse como perturbaciones. En el sector de referencias se disponen diferentes tipos de señales, seleccionables mediantes interruptores, que permiten simular las exigencias operativas del sistema general. El esquema se completa con los correspondientes bloques de ganancias, bloques de retardo y visualizadores para capturar los resultados.

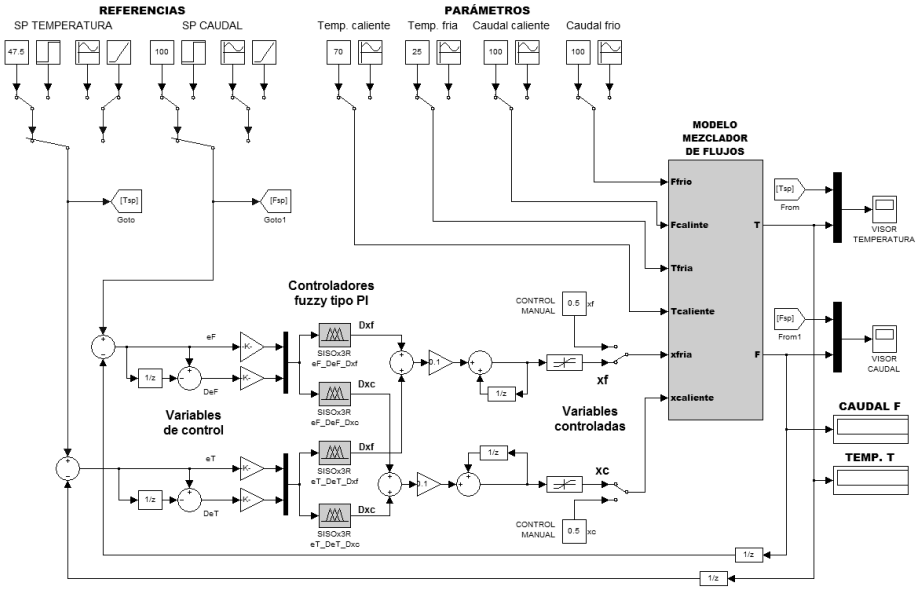

Fig. 5. Modelo experimental Matlab® - Simulink® para el sistema mezclador de caudales con control fuzzy PI.

Para comparar el desempeño del controlador fuzzy PI MIMO diseñado con bloques fuzzy PI SISO, se ha configurado un controlador equivalente fuzzy PI MIMO estándar con las cuatro variables requeridas para responder al tipo proporcional-integral (e_F, Δe_F, e_T, Δe_T), también con tres particiones y una base de 64 reglas, sintonizado con los mismos valores de ganancia que el anterior. Para todas las pruebas, se realizan corridas del sistema durante 100 min.

En la primera prueba experimental, se aplica una función escalón en k=40 min para la referencia de temperatura T_{SP} —manteniendo constante la referencia de caudal F_{SP}— (Fig. 6.a); luego, se mantiene constante la referencia de temperatura T_{SP} y se aplica la función escalón sobre la referencia de caudal F_{SP} en k=60 min (Fig. 6.b). Los resultados se muestran en la Tabla 2.

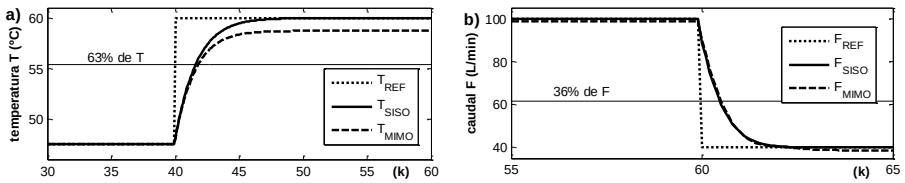

Fig. 6. a) Variación escalón sobre T_{SP}. b) Variación escalón sobre F_{SP}.

En la Tabla 2, se muestran tres índices de desempeño aplicados para la comparación. La columna 63% Var muestra el intervalo de tiempo requerido por cada variable de salida para alcanzar el 63% del valor final de su respectiva referencia, representado la velocidad de respuesta del controlador; la columna Offset muestra la diferencia porcentual entre el valor de la referencia y el valor final alcanzado por cada variable de salida; la columna ECM presenta el error cuadrático medio entre cada variable de salida y la respectiva referencia que ha sufrido variación.

Tabla 2. Comparación de desempeño del controlador fuzzy PI SISOx4 respecto de un controlador fuzzy PI MIMO estándar.

FLC	Función	63% Var	Offset	ECM
PI MIMO – 4 variables 3 particiones – 64 reglas	Escalón sobre T_R	$\Delta k\|_T$=1.8	ΔT_{FINAL}=2.12%	2.3369
PI MIMO – 4 variables 3 particiones. – 64 reglas	Escalón sobre F_R	$\Delta k\|_F$=0.6	ΔF_{FINAL}=3.18%	10.2572
PI SISOx4 – 2x4 variables 3 particiones – 36 reglas	Escalón sobre T_R	$\Delta k\|_T$=1.6	ΔT_{FINAL}=0%	1.2483
PI SISOx4 – 2x4 variables 3 particiones – 36 reglas	Escalón sobre F_R	$\Delta k\|_F$=0.5	ΔF_{FINAL}=0%	7.9927

En una segunda prueba experimental, se provoca una perturbación de tipo sinusoidal del 10% de amplitud sobre el caudal máximo de la corriente caliente F_C, manteniéndose constantes los valores de referencia de las variables de salida temperatura (T_{SP}) y caudal (F_{SP}). Las gráficas siguientes muestran el comportamiento de ambos controladores, destacando el mejor desempeño del controlador fuzzy PI MIMO con bloques SISO, que absorbe convenientemente la perturbación del 10% produciendo una variación máxima del 0.17% sobre el caudal de salida y una variación máxima del 0.36% sobre la temperatura de salida, frente a variaciones mayores generadas por el controlador fuzzy MIMO equivalente.

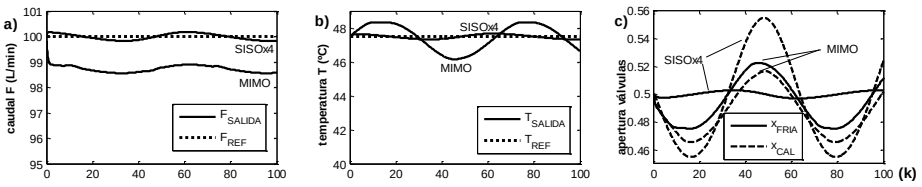

Fig. 7. a) Salida perturbada de F_{SP}. b) Salida perturbada de T_{SP}. c) Regulación de válvulas.

5 Conclusiones

En este trabajo se han desarrollado las diferentes ecuaciones que permiten configurar los tipos estándares de controladores P, I, D, PI, y PD a partir de las ecuaciones —en tiempo discreto— de un controlador general tipo PID, aplicables a la acción de control u y a su variación Δu.

Tomando como base una estructura de tipo PI, se ha diseñado y ajustado —con el procedimiento detallado en el apartado 3— un controlador fuzzy MIMO utilizando bloques controladores fuzzy tipo SISO, sin conocimiento experto, en base a las tablas de decisión de MacVicar–Whelan, utilizando una mínima cantidad de particiones de las variables fuzzy error (e) y de la variación de error (Δe). Para ser aplicado como elemento de comparación se ha configurado un controlador fuzzy PI MIMO estándar, completamente equivalente con el primero.

Para las pruebas experimentales se ha implementado sobre el entorno de simulación gráfica de Matlab®, el modelo de un sistema mezclador de caudales en línea (sin depósito) sobre el que se han ejecutado pruebas de desempeño con ambos controladores, utilizando diferentes índices de performance (Fig. 5).

En base a las pruebas realizadas, se destaca la facilidad de diseño y mejor desempeño del controlador fuzzy MIMO con bloques SISO respecto de su equivalente fuzzy MIMO estándar, que requiere de un conocimiento experto del sistema controlado para configurar la base de reglas. Es importante señalar que la menor eficiencia de este último controlador se debe principalmente a la interferencia que se genera durante el proceso de agregación de varias reglas fuzzy disparadas simultáneamente, lo que no ocurre con los bloques fuzzy SISO.

5 Referencias

1. Al-Odienat A. I., Al-Lawama A. A., The Advantages of PID Fuzzy Controllers Over The Conventional Types, American Journal of Applied Sciences 5 (6), pp. 653-658, (2008).
2. Chen J., He Z.F., Qi X.: A new control method for MIMO first order time delay non-square systems. Journal of Process Control, Volume 21, Issue 4 (2011), 538–546.
3. Martínez, S., Tarifa, E., Núñez A.: Diseño, simulación y comparación de controladores inteligentes aplicados a un proceso industrial. IX Jornadas de Ciencia y Tecnología de las Facultades de Ingeniería del NOA. Vol. 1 (2013), 1-7.
4. Kovacic Z., Bogdan S.: Fuzzy Controller Design, Theory and Applications. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, (2006).
5. Martínez, S., Tarifa, E., Sánchez Rivero, D.: Derivación de reglas de control MIMO para un controlador fuzzy sin conocimiento experto. IV Simposio Internacional de Investigación. Vol. 1 (2011), 1-11.
6. Ross T. J.: Fuzzy Logic with Engineering Applications. John Wiley & Sons Ltd. 3º ed. Chichestr, U.K. (2010).
7. Cheong F., A hierarchical fuzzy system with high input dimensions for forecasting foreign exchange rates. Int. J. Artificial Intelligence and Soft Computing, Vol. 1, No. 1, (2008).